

ارائه مدل بهینه شبکه پروازی قطب و اقمار بر اساس تقاضای موجود (مطالعه موردی: شبکه فرودگاه‌های داخلی ایران)

مجید ذبیحی طاری^۱، محمود صفارزاده^{۲*}، مهدی شریف‌یزدی^۳، علی عبدی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- استادیار، دانشکده دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

Saffar_m@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۸/۱۶

چکیده- صنعت حمل و نقل هوایی، به خاطر تأثیر زیاد بر توسعه اقتصادی و سطح رفاه جوامع، نسبت به سایر روش‌های حمل و نقلی اهمیت ویژه‌ای دارد. شبکه پروازی یکی از اساسی‌ترین اجزای بازار حمل و نقل هوایی است که تأثیر چشم‌گیری بر درآمد شرکت‌های هواپیمایی دارد. برای افزایش کارایی شبکه، وجود یک برنامه‌ریزی مدون ضروری است. شبکه قطب و اقمار به دلیل کاهش هزینه عملیاتی، ایجاد زمینه برای توسعه شبکه پروازی و رقابت، نسبت به شبکه‌های مختلف، در حمل و نقل هوایی کاربرد گسترده‌ای دارد. برای طراحی شبکه قطب و اقمار با توجه به تنوع پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری و همچنین شکل‌های مختلف شبکه، مدل‌های گوناگونی ارائه شده است.

در این پژوهش، مدلی مناسب برای ارزیابی و طراحی شبکه قطب و اقمار، تعیین مسیرهای بهینه پروازی و تخصیص ناوگان به این مسیرها ارائه شده است. در مدل طراحی شده، هر دو حالت ارتباط مستقیم و ارتباط از طریق قطب در نظر گرفته می‌شود و سرانجام، شبکه بهینه با تلفیقی از این دو حالت ارائه می‌شود. همچنین مدل برای الگوی تقاضای ایران با روش انشعاب و تحدید، حل شده که نتایج نشان می‌دهد این مدل جواب‌های منطقی را درباره‌ی مسئله ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: شبکه قطب و اقمار، حمل و نقل هوایی، مکان‌یابی قطب، مدل‌سازی ریاضی و فرودگاه

۱- مقدمه

قطب و اقمار^۱ است که بیشتر برای خدمت‌رسانی به جریان‌های انسانی، بار و اطلاعات بین مبدأها و مقصدها طراحی می‌شود. ساختار این شبکه‌ها به گونه‌ای است که ارتباط مستقیم بین دو نقطه از طریق نقطه‌ای مرکزی، به نام

شبکه‌های مختلفی برحسب مشخصه جریان بین مبدأها و مقصدها شکل می‌گیرد که هدف آن‌ها هماهنگی و تعامل مناسب در انتقال جریان‌های انسانی، بار، اطلاعات، انرژی، آب‌رسانی و ... است. یکی از این شبکه‌ها، شبکه

1- Hub and Spoke

در شبکه‌های تک قطبی، ترافیک در یک قطب متمرکز و سپس از آنجا به مقاصد نهایی فرستاده می‌شود؛ اما در شبکه دو قطبی، ترافیک پس از تجمع در یک قطب به قطب دوم فرستاده و از آنجا به مقاصد نهایی توزیع می‌شود [۲]. اوکلی (۱۹۸۶) یکی از نخستین محققینی است که درباره‌ی طراحی شبکه قطب و اقمار پژوهش زیادی انجام داده است. او موقعیت‌های بهینه حالت یک قطبی و دو قطبی شبکه را از طریق کمینه کردن فاصله-جریان وزنی، تعیین کرد و سپس دریافت که در حالت دو قطبی، همچنان که صرفه‌جویی‌های ناشی از مقیاس^۳ افزایش می‌یابد، موقعیت جغرافیایی دو قطب از هم دورتر می‌شود. تحقیقات دیگری نیز در این مورد انجام شده است که می‌توان به مقالات جنگ^۴ (۱۹۸۸)، کمبل^۵ (۱۹۹۶)، ارنست و کریشنا مورتی^۶ (۱۹۹۶)، جیلست و همکاران^۷ (۱۹۹۶) و ماریانوف و همکاران^۸ (۱۹۹۹) اشاره کرد [۳].

مدل‌های قطب و اقمار فرودگاهی فرضیات و شکل‌های مختلفی دارد که سبب ایجاد مدل‌های متنوعی در این زمینه شده است. در تحقیقات مختلف، دسته‌بندی‌های متفاوتی به وسیله‌ی محققان ارائه شده است. دسته‌بندی آیکین^۹ و اوکلی از این دسته‌بندی‌ها و قوانین مدل‌سازی است.

آیکین سه قانون زیر را ارائه و مدل‌های مختلفی را در حیطه هر یک، ارائه داده است:

۱- تأکیدی بر قطب وجود ندارد: در این حالت اجباری نیست که ارتباط بین دو نقطه از قطب بگذرد، در این حالت، قطب وجود دارد اما فقط زمانی یک جریان از قطب عبور می‌کند که از نظر اقتصادی به صرفه باشد.

قطب ایجاد شده و اتصال بین این دو نقطه به صورت غیرمستقیم برقرار می‌شود. در این شبکه‌ها ابتدا ترافیک نقطه مبدأ به نقطه قطب و از آنجا به مقصد، انتقال داده می‌شود. پس از مقررات‌زدایی در حمل و نقل هوایی امریکا، برای استفاده بیشتر از مزایای اقتصادی، از میان شبکه‌های مختلف حمل و نقلی، شبکه قطب و اقمار^۱ نسبت به دیگر شبکه‌ها بیشتر مورد توجه شرکت‌های هواپیمایی قرار گرفته است. در کشورهایی مانند کانادا، چین و استرالیا نیز پس از مقررات-زدایی، اتفاق مشابهی رخ داده است. شرکت‌های هواپیمایی در یک محیط مقررات‌زدایی^۲ شده، آزادانه و بر اساس عرضه و تقاضای موجود در بازار، به طراحی شبکه پروازی خود اقدام می‌کنند. مسئله طراحی شبکه در شرکت‌های هواپیمایی بدین صورت تعریف می‌شود: پیدا کردن ساختار شبکه و مسیرهای بهینه برای حمل مسافر هدف، با کمینه کردن هزینه حمل و نقل برای به دست آوردن سود بیشتر [۱].

در طراحی شبکه قطب و اقمار، تعیین تعداد قطب‌ها و مسیرهای منتهی به آن‌ها اهمیت زیادی دارد که در این زمینه بیشتر از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. از آنجا که پارامترهای مدل بسته به شرایط بازار و جغرافیای محیط متفاوت است، در این زمینه مدل‌های زیادی ارائه شده است. در این پژوهش ابتدا یک مدل ریاضی برای رسیدن به هدف گفته شده ساخته می‌شود، به گونه‌ای که برای شبکه داخلی پروازهای ایران نیز کارایی داشته باشد. در نهایت مدل برای شبکه پروازهای داخلی ایران حل شده و نتایج آن ارائه می‌شود.

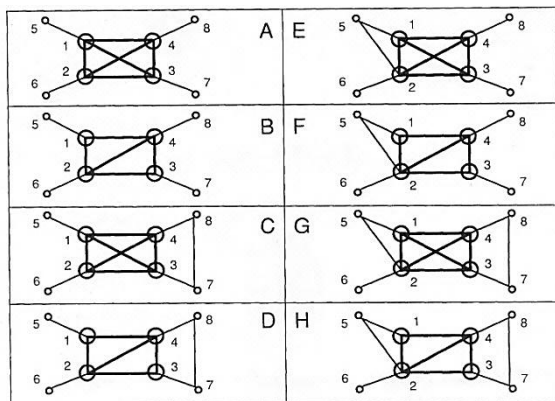
۲- پیشینه پژوهش

شبکه‌های قطب و اقمار در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: شبکه‌های تک قطبی و شبکه‌های دو یا چند قطبی.

- 1- hub and spoke network
- 2- deregulation

3- Economic of Scale
4- Jeng
5- Campbell
6- Ernst and Krishnamoorthy
7- Jaillet et al.
8- Marianov et al.
9- Aykin

ج- D_3 (ارتباط بین قطب‌ها): اگر این ارتباط به صورت کامل برقرار شود، متغیر برابر یک و اگر این ارتباط به صورت ناقص برقرار شود، متغیر برابر صفر خواهد بود. اوکلی بر اساس این سه متغیر، هشت شکل شبکه را تعریف کرده که در شکل ۱ مشخص است. برای مثال در شکل A هر سه متغیر برابر یک است و در شکل B دو متغیر اول برابر یک و متغیر سوم برابر صفر است [۴]. از آنجا که نوع H آزادی عمل بیشتری را به شرکت‌های هواپیمایی می‌دهد و به خصوص برای پروازهای کوتاه‌برد و میان‌برد، اقتصادی‌تر است؛ نوع H شکل برای ساخت مدل این پژوهش در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، حالت تک‌قطبی با توجه به وسعت کشور ایران و همچنین اهمیت زمان در پروازهای داخلی برای جلوگیری از اتلاف وقت بیش از حد مسافران، برای ساخت مدل در نظر گرفته شده است.



شکل (۱) شکل‌های پیشنهادی A تا H اوکلی [۵]

پس از انتخاب شکل شبکه و فرضیات مربوط، پارامترها، متغیرها و تابع هدف مدل باید مشخص شوند. در مدل‌های ارائه شده به وسیله‌ی محققان، انتخاب پارامترها نیز مانند انتخاب شکل شبکه تنوع زیادی دارد که سبب ایجاد مدل‌های مختلفی شده است؛ هرچند که برخی از پارامترها و متغیرهای اصلی در مدل‌ها به صورت مشترک به کار برده شده است. برای مثال، جیلت با هدف کمینه کردن هزینه

۲- تأکید بر قطب، بدون اعمال محدودیت وجود دارد: در این حالت جریان‌ها از قطب‌ها می‌گذرند اما محدودیتی وجود ندارد. بدین معنی که جریان نقاط اقماری، می‌توانند برای رسیدن به مقصدهای مختلف از قطب‌های مختلف استفاده کنند یا به عبارتی می‌توانند به بیش از یک قطب متصل شوند. اوکلی این حالت (اتصال به بیش از یک قطب) را تخصیص چندگانه^۱ می‌نامد.

۳- تأکید بر قطب با اعمال محدودیت وجود دارد: در این حالت نه تنها جریان باید از قطب‌ها عبور کند، بلکه باید هر نقطه اقماری، فقط به یک قطب اختصاص یابد. اوکلی، این حالت (اتصال فقط به یک قطب) را تخصیص یگانه^۲ می‌نامد.

آیکین به این نتیجه رسید که حالت اول نسبت به حالت دوم به صرفه‌تر است و حالت سوم کمترین مطلوبیت را دارد [۱]. بنابراین برای ساخت مدل این پژوهش، حالت اول در نظر گرفته شده است.

جامع‌ترین طبقه‌بندی از شکل‌های مختلف شبکه قطب‌واقمار را اوکلی ارائه داده است. او شبکه‌ها را به هشت شکل مختلف تقسیم‌بندی کرده است. برای این تقسیم‌بندی، اوکلی سه متغیر تصمیم‌گیری صفر و یک را در نظر گرفته و بر این اساس، هشت شکل را برای شبکه پیشنهاد داده است. این سه متغیر تصمیم، عبارتند از:

الف- D_1 (تخصیص نقاط اقماری به قطب): اگر نقاط اقماری به یک قطب تخصیص داده شوند، متغیر برابر یک و اگر به چند قطب تخصیص یابند، متغیر برابر صفر است.
ب- D_2 (اتصال مستقیم بین نقاط اقماری): اگر در مدل، برقراری ارتباط مستقیم بین اعمار مجاز نباشد، متغیر برابر یک و اگر ارتباط مستقیم بین نقاط اقماری مجاز باشد، متغیر برابر صفر است.

1- Multiple Allocation
2- Single Allocation

۳- بیان مسئله و ارائه مدل ریاضی

مسئله قطب واقمار در کلی‌ترین شکل آن شامل موارد زیر است:

- ۱- پیدا کردن مکان بهینه برای قطب‌ها؛
- ۲- تخصیص مبدأها و مقصدهای اقماری به قطب‌ها؛
- ۳- تعیین ارتباط بین قطب‌ها و
- ۴- مسیریابی جریان‌های شبکه [۴].

هدف این پژوهش، شکل‌گیری ایده قطب واقمار به صورت یک مدل ریاضی با اقلع شرایط بندهای قبل است.

در این مدل، مجموعه‌ای از فرودگاه‌ها به گونه‌ای به

یکدیگر متصل می‌شوند که همه‌ی تقاضای موجود بین

فرودگاه‌ها، پاسخ داده شوند. برای این کار از شبکه

قطب واقمار به عنوان شبکه پروازی بین فرودگاه‌ها استفاده

شده است. از بین دو شکل موجود این شبکه (شبکه

تک‌قطبی و شبکه دو یا چندقطبی) با توجه به حوزه

پژوهش (کشور ایران)، از شکل تک‌قطبی استفاده شده

است. بدین معنا که برای جابه‌جایی از یک مبدأ به یک

مقصد، در بیشترین حالت در یک قطب، و یا به عبارتی، در

یک فرودگاه میانی، توقف انجام می‌شود. در این شبکه فقط

تقاضای مسافری بین فرودگاه‌ها در نظر گرفته شده و مدل

برای شبکه‌های حمل مسافر ارائه شده است. انتخاب قطب-

ها باید به گونه‌ای باشد که شبکه بهینه حاصل شود. به

عبارت دیگر با این مدل باید مشخص شود که تقاضای بین

یک مبدأ و مقصد مشخص چگونه باید جابه‌جا شود تا

شبکه از نظر اقتصادی، به صرفه باشد. انتقال از یک مبدأ به

یک مقصد می‌تواند به صورت مستقیم و یا عبور از یک

قطب (در بیشترین حالت) انجام شود؛ به صورتی که در

فرودگاه قطب با جذب تقاضاهای موجود دیگر به سمت

همان مقصد یا ترکیب تقاضا به مقاصد مختلف در فرودگاه

مقصد به مقصد اولیه یک قطب، بتوان از آثار مقیاس

استفاده کرد (جمع کردن تقاضا در یک نقطه و استفاده از

عملیاتی کل شبکه، نوع هواپیما، تقاضای مسافری، هزینه هر واحد پرواز (مایل یا کیلومتر)، ظرفیت هر نوع هواپیما، فاصله هوایی بین دو شهر و تعداد شهرهای تحت پوشش شرکت هواپیمایی را به عنوان پارامترهای ورودی و جریان مسافری در پروازهای مستقیم، جریان مسافری در پروازهای عبوری از قطب و تعداد هر نوع هواپیما را به عنوان متغیرهای مدل خود در نظر گرفته و مدل را به صورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۱ ارائه داده است. مدل جیلت به سه شکل مطرح و با استفاده از یک روش ابتکاری^۲ حل شده است [۱].

ساساکی^۳، مدل خود را به صورت p-median با هدف کمینه کردن هزینه کل شبکه، فرموله کرده است. مدل ساساکی به صورت تک قطبی با فرض محدودیت تعداد قطب‌ها در شبکه، ارائه شده است. این مدل با استفاده از روش انشعاب و تحدید^۴ و یک روش ابتکاری در مسائل گسترده‌تر، حل می‌شود [۵].

آدلر و برچمن^۵، مدل ریاضی غیرخطی خود را با هدف بیشینه کردن سود کل شبکه، فرموله کردند. این مدل با تفکیک سفرهای تفریحی و کاری از یکدیگر، با استفاده از الگوریتم گولدفارب^۶ حل شده است [۳].

مدل‌های دیگری نیز در این زمینه ارائه شده است که با توجه به سیاست شرکت‌های هواپیمایی دارای متغیرها، پارامترها و توابع هدف مختلفی است. به طور کلی، در مدل‌های مختلف، کمینه کردن هزینه یا بیشینه کردن سود شرکت، به عنوان تابع هدف لحاظ شده که در بیشتر مدل‌ها، کمینه کردن هزینه شرکت تابع، هدف قرار گرفته است.

1- Mixed Integer Programming

2- Heuristic Method

3- Sasaki

4- Branch & Bound

5- Adler and Berechman

6- Goldfarb Algorithm

ناوگان با ظرفیت بیشتر).

شود، زیرا فقط تعداد مشخصی از فرودگاه‌ها شرایط قطب شدن را دارند و هزینه اولیه انتخاب قطب برای شرکت هواپیمایی نیز باید در نظر گرفته شود.

۳-۱- فرضیات مدل

با توجه به فرض‌های مدل با هدف کمینه کردن هزینه کل شبکه، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل به ترتیب زیر انتخاب می‌شوند:

فرض می‌شود برای ناوگان، محدودیت وجود ندارد؛ که این فرض، منطقی به نظر می‌رسد زیرا شرکت‌ها با توجه به تقاضای خود، توانایی خرید و نوسازی ناوگان را دارد. با توجه به این که هر نوع هواپیما، توانایی پرواز تا محدوده خاصی را دارد، در مدل فرض محدودیت برد ناوگان لحاظ می‌شود.

۳-۲-۱- مجموعه‌های مدل

$V = \{\text{مجموعه کل فرودگاه‌ها}\}$

$S = \{\text{مجموعه مبدأها}\}$

$H = \{\text{مجموعه فرودگاه‌های قطب}\}$

$D = \{\text{مجموعه مقصدها}\}$

$P = \{\text{مجموعه انواع هواپیماها}\}$

در مدل فرض می‌شود، روابط زیر بین مجموعه‌ها برقرار باشد:

$$S \subseteq V, H \subseteq V, D \subseteq V$$

با توجه به حالت‌های مختلف مدل، شکل H اوکلی، به عنوان شبکه مناسب برگزیده می‌شود؛ زیرا این نوع شبکه اقتصادی‌ترین شکل شبکه است [۴]. بنابراین امکان ارتباط مستقیم بین فرودگاه‌های اقماری در صورت اقتصادی بودن شبکه، وجود دارد. همچنین فرض می‌شود ارتباط مستقیم میان قطب‌ها در حالی مجاز شمرده شود که از نظر اقتصادی به صرفه باشد. در مورد تخصیص فرودگاه‌های اقماری به قطب‌ها نیز فرض می‌شود که تخصیص چندگانه برای اختصاص تقاضای یک فرودگاه به قطب، مجاز باشد. در این حالت تنوع انتخاب به وسیله مشتری بیشتر است؛ در ضمن این حالت نسبت به تخصیص یگانه، اقتصادی‌تر است.

۳-۲-۲- پارامترهای مدل

C_p : هزینه هر ساعت پرواز هواپیمای نوع $p \in P$ ؛

C'_p : هزینه ثابت پرواز هواپیمای نوع $p \in P$ ؛

d_{ij} : فاصله زمانی بین فرودگاه i تا $j \in V$ ؛

P : ظرفیت (تعداد صندلی) هواپیمای نوع p ؛

h_p : برد هواپیمای نوع p .

۳-۲- طراحی مدل ریاضی

طراحی مدل به صورت تک‌قطبی انجام می‌شود، اما تأکیدی بر عبور از قطب وجود ندارد و با توجه به شکل انتخاب شده، ممکن است ارتباط مستقیم بین مبدأ و مقصد (در صورت اقتصادی بودن) نیز برقرار شود.

$$V_{pij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

پارامتر V_{pij} در صورتی برابر ۱ است که هواپیمای نوع p توانایی پرواز میان نقاط i و j را داشته باشد ($d_{ij} \leq h_p$) و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

r_{ik} : تقاضای پرواز از مبدأ i به مقصد $k \in D$ ؛

b_j : هزینه انتخاب فرودگاه کاندیدای j به عنوان فرودگاه

در این مدل برای قطب‌ها، محدودیت ظرفیت مسافری در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی مجموع مسافرانی که از مبدأهای مختلف به یک قطب وارد می‌شوند باید از مقدار ظرفیت فرودگاه کمتر یا در بیشترین حالت، مساوی آن باشند. تعداد قطب‌های یک شبکه نیز محدود انتخاب می-

قطب $j \in H$ ؛
 α_{pik} و γ_{ijk} و در مرحله دوم مدل، متغیرهای d_{pik} و t'_{pijk} و t''_{pijk} تعیین می‌شوند. تابع هدف در مرحله اول این مدل قرار دارد و در مرحله دوم، فقط مسافران حمل شده با هواپیمای نوع P تعیین می‌شود. بدین ترتیب چارچوب مرحله اول مدل به صورت زیر ارائه می‌شود.

بیشینه‌ی تعداد مسافری که می‌توانند از فرودگاه کاندیدای Z به عنوان قطب استفاده کنند $Z \in H$ و n بیشینه‌ی تعداد فرودگاههایی که می‌توانند به عنوان قطب انتخاب شوند.

۳-۲-۴- مرحله اول مدل

$$\text{Min. } Z = \sum_{p \in P} \sum_{i \in S \cup H} \sum_{\substack{k \in D \cup H \\ k \neq i}} (c_p \cdot d_{ik} + c'_p) \cdot X_{pik} + \sum_{j \in H} b_j \cdot u_j \quad (1)$$

$$S. t \quad Y_{ik} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in S - H, k \in D - H, i \neq k \quad (2)$$

$$Y_{ik} + \sum_{\substack{j \in D \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{ijk} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in S - H, k \in D \cap H, i \neq k \quad (3)$$

$$Y_{ik} + \sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{jik} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in S \cap H, k \in D - H, i \neq k \quad (4)$$

$$Y_{ik} + \sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{jik} + \sum_{\substack{j \in D \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{ijj} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in S \cap H, k \in D \cap H, i \neq k \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{j \in D \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{ikj} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in S, k \in H - D, i \neq k \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{jik} \leq \sum_{p \in P} S_p \cdot X_{pik}, \quad i \in H - S, k \in D, i \neq k \quad (7)$$

$$Y_{ik} + \sum_{\substack{j \in H \\ j \neq i \\ j \neq k}} Y'_{ijk} = r_{ik}, \quad i \in S, k \in D, i \neq k \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{i \in S \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in D \\ k \neq j}} Y'_{ijk} \leq a_j \cdot u_j, \quad j \in H \quad (9)$$

$$X_{pik} \leq M \cdot v_{pik}, \quad p \in P, i \in S \cup H, k \in D \cup H, i \neq k \quad (10)$$

$$\sum_{j \in H} u_j \leq n \quad (11)$$

$$\begin{cases} X_{pik} \geq 0, \text{ int} \\ Y_{ik} + Y'_{ijk} \geq 0 \\ u_j \in \{0, 1\} \end{cases} \quad \forall i, j, k \quad (12)$$

۳-۲-۳- متغیرهای تصمیم‌گیری

X_{pik} : تعداد هواپیمای نوع P که از مبدأ یا قطب i به مقصد یا قطب K می‌رود

$$p \in P, i \in S \cup H, k \in D \cup H, i \neq k, (i, k) \notin (H - S) \times (H - D)$$

γ_{ijk} : تعداد مسافری که از مبدأ i مستقیماً به مقصد K می‌رود.

$$i \in S, k \in D, i \neq k, \gamma'_{ijk}$$

سفر به مقصد k ، به قطب Z می‌رود

$$i \in S, j \in H, k \in D, i \neq k, i \neq j, j \neq k$$

t_{pik} : تعداد مسافری که با هواپیمای نوع p ، مستقیماً از

مبدأ i به مقصد k می‌رود

$$p \in P, i \in S, j \in H, k \in D, i \neq k$$

t'_{pijk} : تعداد مسافری که با هواپیمای نوع p ، برای سفر

از مبدأ i به مقصد k ، از مبدأ i به قطب Z می‌رود

$$p \in P, i \in S, j \in H, k \in D, i \neq k, i \neq j, j \neq k$$

t''_{pijk} : تعداد مسافری که با هواپیمای نوع p ، برای سفر

از مبدأ i به مقصد k ، از قطب Z به مقصد k می‌رود

$$p \in P, i \in S, j \in H, k \in D, i \neq k, i \neq j, j \neq k$$

u_j : متغیر صفر و یک؛ در صورتی که فرودگاه Z به

عنوان قطب انتخاب شود برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

مدل ریاضی این پژوهش، برای سهولت حل مدل، در دو

مرحله ارائه شده است. در مرحله اول، سه متغیر تصمیم‌گیری

$$t_{pik} + \sum_{j \in S} t'_{pjik} + \sum_{j \in D} t''_{pjik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in S \cap H, k \in D \cap H, i \neq k \quad (16)$$

$$\sum_{j \in D} t'_{pjik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in S, k \in H - D, i \neq k \quad (17)$$

$$\sum_{j \in S} t''_{pjik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in H - S, k \in D, i \neq k \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} t'_{pjik} = \sum_{p \in P} t''_{pjik} = y'_{ijk}, \quad i \in S, j \in H, k \in D, i \neq k, i \neq j, j \neq k \quad (19)$$

$$\sum_{p \in P} t_{pik} = y_{ik}, \quad i \in S, k \in D, i \neq k \quad (20)$$

$$t_{pik}, t'_{pjik}, t''_{pjik} \geq 0 \quad \forall p, i, j, k \quad (21)$$

۴- حل مدل ریاضی

برای حل مدل، شبکه پروازهای داخلی ایران به عنوان منطقه مطالعه موردی انتخاب شده است. مدل ارائه شده با توجه به موقعیت ایران و داده‌های موجود، حل شده است و نتایج آن به صورت زیر، مورد تحلیل شده است.

با توجه به داده‌های موجود سازمان هواپیمایی کشوری [۶]، سال ۱۳۸۴ برای مطالعه انتخاب شده است. در این سال، ۵۹ فرودگاه فعال، به عنوان مجموعه کل فرودگاه‌ها و مجموعه مبدأهای سفر در نظر گرفته شده است. مجموعه فرودگاه‌های قطب نامزد و مقصد که در این مطالعه برابر در نظر گرفته شده ۸ فرودگاه است که شامل فرودگاه‌های اصفهان، اهواز، بندرعباس، تبریز، تهران، شیراز، کرمان و مشهد است. ۹۸ درصد از مجموع مسافران جابه‌جا شده داخل کشور در سال ۸۴ به مبدأ یا مقصد این ۸ فرودگاه پرواز داشته‌اند؛ بنابراین انتخاب این فرودگاه‌ها به عنوان قطب و مجموعه مقاصد می‌تواند تا حد زیادی شرایط واقعی را مدل کند. برای ورودی مدل، تقاضای یک روز به-خصوص در این سال انتخاب شده است. داده‌های مربوط به تقاضای میان فرودگاه‌ها از سازمان هواپیمایی کشوری برای مسیرهای موجود و از مدل پیش‌بینی تقاضای

شش محدودیت کارکردی اول، مربوط به ظرفیت ناوگان است. در محدودیت اول، ظرفیت برای پرواز مستقیم بین دو فرودگاه اقماری کنترل می‌شود؛ در محدودیت دوم، پروازهای بین مبدأهای اقماری به مقصد نهایی یک فرودگاه قطب با پرواز مستقیم و پرواز از یک مبدأ اقماری به یک فرودگاه قطب برای تعویض هواپیما در نظر است؛ محدودیت سوم مربوط به پرواز به مبدأ قطب و مقصد اقماری است؛ محدودیت چهارم مربوط به پرواز بین قطب‌ها است. در مواردی که فرودگاه قطب در مجموعه مبدأها یا مقصدها قرار نداشته باشد، با محدودیت‌های پنجم و ششم، محدودیت‌های این پروازها کنترل می‌شود.

با محدودیت هفتم، پاسخ‌گویی به تقاضای بین دو فرودگاه، چه به صورت مستقیم و چه به صورت عبور از یک قطب، کنترل می‌شود. با محدودیت هشتم، کنترل تجاوز مسافران تجمعی در یک قطب از ظرفیت مسافری قطب انجام می‌شود. با محدودیت نهم، برد هواپیما کنترل می‌شود و سرانجام محدودیت دهم کنترل می‌کند که تعداد قطب‌ها از مقدار مشخص شده، تجاوز نکند.

۳-۲-۵- مرحله دوم مدل

در مرحله دوم مدل، تخصیص نوع ناوگان، برای جواب‌های مرحله اول مشخص می‌شود. محدودیت‌های مرحله دوم بر اساس محدودیت‌های ظرفیتی مرحله اول مدل شکل می‌گیرد. بنابراین محدودیت‌های کارکردی مربوط به مرحله دوم مدل به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$t_{pik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in S - H, k \in D - H, i \neq k \quad (13)$$

$$t_{pik} + \sum_{j \in D} t'_{pjik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in S - H, k \in D \cap H, i \neq k \quad (14)$$

$$t_{pik} + \sum_{j \in S} t''_{pjik} \leq S_p \cdot X_{pik}, \quad p \in P, i \in S \cap H, k \in D - H, i \neq k \quad (15)$$

صفازاده و قربانی [7]، برای مسیرهایی که در سال ۱۳۸۴ پرواز دایر نداشته، جمع‌آوری شده است.

پنج نوع هواپیما به عنوان مجموعه انواع هواپیماها، با توجه به داده‌های در دسترس، در نظر گرفته شده است. این ۵ هواپیما و ظرفیت آن‌ها در جدول ۱ درج شده است. میزان متوسط هزینه عملیاتی این هواپیماها از شرکت هواپیمایی ایران‌ایر گرفته شده و با واقعیت تطابق دارد. هواپیماها نیز به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تمامی محدوده‌های ظرفیتی را پوشش دهد.

این مدل با استفاده از نرم‌افزار لینگو^۱، در ۷ حالت $n=1$ تا $n=8$ ، و با استفاده از روش انشعاب و تحدید حل شده است و جواب دقیق به‌دست آمده است.

جدول (۱) مجموعه هواپیماهای مدل و ظرفیت آن‌ها

نوع هواپیما	بوئینگ	ایرباس	فوکر	ای تی آر	فوکر
	۷۲۷-۲۰۰	۳۰۰	۱۰۰	۷۲	۵۰
ظرفیت	۱۵۴	۲۷۷	۱۰۴	۷۵	۵۰

۴-۱- نتایج مطالعه موردی

در این مسئله مقدار پارامتر b_j به‌خاطر نداشتن اطلاعات کافی و تأثیر ناچیز در طولانی‌مدت، برابر صفر در نظر گرفته شده است.

مجموعه قطب‌های انتخاب‌شده به شرح جدول ۲ است. در ردیف دوم جدول، درصد مسافرانی که به مقصد قطب‌ها پرواز دارند نسبت به کل تقاضا، درج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مقادیر نشان می‌دهند که تقاضای قطب‌ها تأثیر چندانی در انتخاب آن‌ها به‌عنوان قطب نداشته است و موقعیت جغرافیایی قطب‌ها و الگوی تقاضا اهمیت بسیاری دارد. برای نمونه $14/8$ درصد از مسافران به مقصد مشهد پرواز دارند که بعد از تهران، بیشترین سهم را دارد،

اما مشهد به عنوان قطب هشتم به شبکه اضافه می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هرچه فاصله میان مبدأ و مقصد بیشتر باشد، احتمال انتقال از طریق قطب بیشتر است؛ به عبارت دیگر، هرچه فاصله میان مبدأ و مقصد بیشتر باشد، استفاده از شبکه قطب واقمار به‌صرفه‌تر خواهد بود؛ تا جایی که در پنج شبکه، همه‌ی مسافرانی که بیشتر از $1/5$ ساعت برای رسیدن به مقصد باید پرواز کنند، از طریق قطب انتقال داده می‌شوند. در دو شبکه دیگر نیز درصد مسافرانی که در این دسته قرار دارند و مستقیم به مقصد انتقال داده می‌شوند، بسیار ناچیز است (جدول ۳).

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که هرچه تقاضای بین نقاط کمتر باشد، استفاده از شبکه قطب واقمار اقتصادی‌تر خواهد بود؛ زیرا در تقاضاهای پایین‌تر بین نقاط، از صرفه-جویی‌های ناشی از مقیاس بیشتر می‌توان استفاده کرد.

مقدار هزینه عملیاتی شبکه در مقادیر n مختلف مطابق شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد قطب‌های شبکه، هزینه عملیاتی کاهش یافته که نشان می‌دهد نتایج مدل در این مورد منطقی است. با توجه به این‌که در مدل، تأکید بر عبور از قطب وجود ندارد، شکل ۲ نشان می‌دهد، با توجه به داده‌های ورودی، شبکه قطب واقمار شبکه بهینه‌تری نسبت به شبکه نقطه‌به‌نقطه است.

در جدول ۴ نسبت کاهش هزینه عملیاتی در شبکه قطب واقمار به شبکه نقطه‌به‌نقطه درج شده است.

همان‌طور که در جدول بالا درج شده است، مقدار کاهش هزینه بعد از شبکه پنج‌قطبی نسبت به شبکه قبلی ناچیز است (حدود $1/5$ درصد). با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که تعداد قطب بهینه بین ۴ تا ۶ قطب است. درصد مسافران عبوری از قطب برای تقاضای جفت شهرهایی که کمتر از $1/5$ ساعت فاصله پروازی دارند

۵ قطبی همراه خواهد داشت؛ بنابراین شبکه ۶ قطبی از گزینه‌های ممکن حذف خواهد شد. با توجه به این که شبکه ۴ و ۵ قطبی در شاخص‌های جداول ۴ و ۵ و شکل ۲ تفاوت چندانی ندارند و هزینه ثابت قطب پنجم نیز وجود دارد، شبکه ۴ قطبی به عنوان شبکه بهینه انتخاب می‌شود.

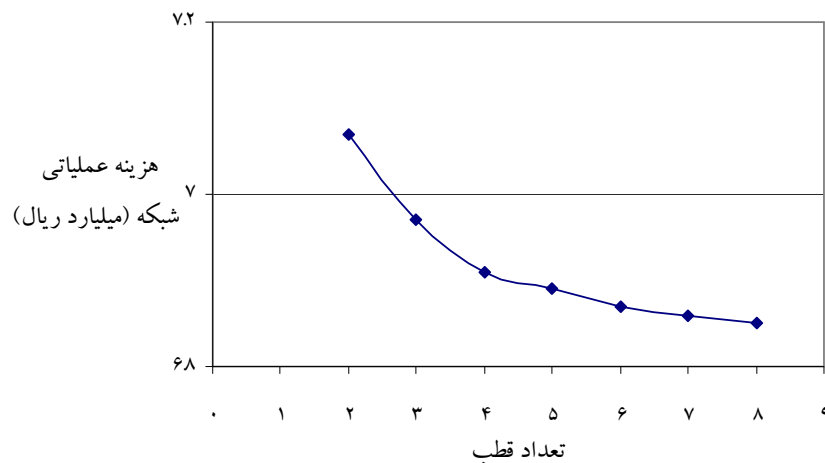
نسبت به کل مسافران موجود بین این نقاط، در شبکه‌های مختلف در جدول ۵ درج شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه شش قطبی برای پروازهای کمتر از نیم ساعت، ۱۷/۳ درصد از مسافران را از قطب عبور می‌دهد که اتلاف وقت و ریزش تقاضا را نسبت به شبکه‌های ۴ و

جدول (۲) قطب‌های انتخاب شده با تعداد قطب‌های مختلف

تعداد قطب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قطب اضافه شده	تهران	شیراز	کرمان	اصفهان	اهواز	بندرعباس	تبریز	مشهد
درصد مسافرانی که به مقصد قطب فوق پرواز دارند	۳۷/۳	۱۳/۶	۴/۹	۸/۱	۱۰/۷	۳/۹	۶/۷	۱۴/۸

جدول (۳) درصدی از مسافران بین نقاطی که بیشتر از ۱/۵ ساعت فاصله پروازی دارند و از قطب عبور می‌کنند

تعداد قطب‌های شبکه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
درصد مسافران عبوری از قطب	۹۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	۱۰۰
در فواصل بیشتر از ۱/۵ ساعت							



شکل (۲) هزینه عملیاتی کل شبکه بر اساس تعداد قطب‌های شبکه (n)

جدول (۴) درصد کاهش هزینه شبکه‌های مختلف قطب‌واقمار نسبت به شبکه نقطه به نقطه

تعداد قطب‌های شبکه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
درصد کاهش هزینه	۱۵/۷	۱۶/۹	۱۷/۶	۱۷/۹	۱۸/۱	۱۸/۳	۱۸/۴

جدول (۵) درصدی از مسافران بین نقاطی که کمتر از ۰/۵ ساعت فاصله پروازی دارند و از قطب عبور می‌کنند

تعداد قطب‌های شبکه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
درصد مسافران عبوری از قطب در فواصل کمتر از ۰/۵ ساعت	۲۰	۶/۶	۶/۵	۶/۸	۱۷/۳	۷/۲	۱۱/۷

۴-۲- نتایج شبکه قطبی

در جدول ۶، مقاصد مختلف در شبکه قطبی و درصد مسافرانی که به صورت مستقیم و از طریق قطب به این مقاصد جابه جا می شوند، درج شده است.

جدول (۶) درصد مسافرانی که به مقاصد مختلف مستقیماً و یا از طریق

قطب سفر می کنند

مقصد	درصد مسافرانی که مستقیماً به مقصد مربوط پرواز می کنند	درصد مسافرانی که از طریق قطب دیگر به مقصد مربوط پرواز می کنند
تهران	۷۸/۰	۲۲/۰
شیراز	۵۲/۱	۴۷/۹
کرمان	۶۵/۹	۳۴/۱
اصفهان	۶۳/۵	۳۶/۵
اهواز	۵۵/۰	۴۵/۰
بندرعباس	۶۳/۶	۳۶/۴
تبریز	۵۵/۷	۴۴/۳
مشهد	۵۶/۱	۴۳/۹

نشان می دهد در فرودگاه های کرمان و اصفهان تعداد مسافرانی که از این فرودگاه ها به عنوان قطب استفاده می کنند، بیش از تعداد مسافرانی است که از این فرودگاه ها به عنوان مقصد استفاده می کنند. بنابراین برای بسیاری از فرودگاه ها استفاده از شبکه قطب واقمار موجب افزایش بازدهی خواهد شد که این مطلب برای فرودگاه های با تقاضای کمتر نمود بیشتری خواهد داشت.

جدول (۷) درصد مسافرانی که از فرودگاه به عنوان قطب استفاده می کنند نسبت به مجموع مسافرانی که از این فرودگاه به عنوان قطب و یا مقصد استفاده می کنند

فرودگاه قطب	درصد مسافرانی که از این فرودگاه به عنوان قطب استفاده می کنند نسبت به مجموع مسافرانی که از این فرودگاه به عنوان قطب و مقصد استفاده می کنند
تهران	۱۸/۸
شیراز	۴۰/۹
کرمان	۶۰/۱
اصفهان	۵۴/۳

از لحاظ استفاده از ناوگان در شبکه قطبی، ضمن پاسخ گویی به همه ی تقاضای موجود، ضریب ظرفیت مسافری^۱ بیش از ۹۰ درصد حاصل شده است که از لحاظ اقتصادی، شبکه را برای شرکت های هواپیمایی مطلوب نشان می دهد.

در جدول ۸، تعداد پروازهایی که با هر نوع از هواپیماها در شبکه انجام شده، درج شده است. همان طور که در این جدول نشان داده شده است، با این الگوی تقاضا در شبکه قطب واقمار قطبی، نیاز به هواپیماهای با ظرفیت بالا و پایین نسبت به هواپیماهای با ظرفیت متوسط بیشتر است. هر چند هواپیمای بوئینگ ۲۰۰-۷۲۷ با ظرفیت متوسط و تعداد پرواز کمتر، درصد مسافر بیشتری را نسبت به هواپیمای فوکر ۵۰ با ظرفیت پایین جابه جا کرده است.

یکی از مزایای شبکه قطب واقمار، فعال تر شدن فرودگاه های قطب به خاطر جذب تقاضای مسافران انتقالی است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، فقط میزان تقاضا بر جذب مسافر انتقالی مؤثر نیست و عواملی مانند موقعیت جغرافیایی و الگوی تقاضا نیز بر انتخاب شدن یک فرودگاه به عنوان قطب مؤثر است. در فرودگاه های بزرگ، این مسئله سبب ایجاد تراکم و در فرودگاه های کوچک، موجب فعال تر شدن و افزایش بازدهی فرودگاه خواهد شد. با توجه به این که در مدل طراحی شده، ظرفیت قطب ها محدود شده، مشکل اول (ایجاد تراکم) در صورت استفاده از این مدل به وجود نخواهد آمد. جدول ۷ نشان می دهد مسافرانی که از هر فرودگاه به عنوان قطب استفاده می کنند چند درصد از کل مسافرانی را تشکیل می دهند که از فرودگاه مورد نظر به عنوان قطب یا مقصد استفاده می کنند. همان طور که نتایج جدول

1- Load Factor

جدول (۸) تعداد پرواز و درصد مسافر حمل شده با انواع هواپیماها

نوع هواپیما	تعداد پرواز در شبکه	درصد مسافر حمل شده در شبکه
ایرباس ۳۰۰	۱۳۹	۷۷/۱
فوکر ۵۰	۷۸	۶/۴
بوئینگ ۷۲۷-۲۰۰	۴۵	۱۲/۳
فوکر ۱۰۰	۱۶	۲/۵
ای تی آر ۷۲	۱۴	۱/۶

۵- خلاصه و نتیجه گیری

امروزه شبکه قطب و اقمار به عنوان یک شبکه کارآمد، مورد توجه بسیاری از شرکت های هوایی در دنیا قرار گرفته است. مهم ترین مزیت این شبکه، استفاده از صرفه جوییهای ناشی از مقیاس است که باعث کاهش هزینه عملیاتی و در نتیجه افزایش سودآوری برای شرکت های هوایی می شود. برای ارزیابی این شبکه برای نواحی مختلف و همچنین طراحی آن، مدل های بسیاری مورد استفاده شرکت های هواپیمایی قرار گرفته است.

در این پژوهش با مطالعه پارامترها، متغیرها و توابع هدف مختلف مدل های ارائه شده در دنیا و با توجه به شرایط ایران، ترکیبی از متغیرها و پارامترهای مدل های مختلف با هدف کمینه کردن هزینه عملیاتی مجموع شبکه، انتخاب و یک مدل برنامه ریزی خطی مختلط برای طراحی شبکه قطب و اقمار فرودگاهی برای انتخاب تعداد قطب های بهینه، تعیین مکان قطب ها، تعیین مسیرهای بهینه پروازی و تخصیص هواپیماها به مسیرها ارائه شد.

مدل ارائه شده برای شبکه پروازی داخلی ایران در سال ۱۳۸۴ با روش انشعاب و تحدید، با نرم افزار لینگو، حل شد. مدل برای شبکه های ۱ تا ۸ قطبی، حل شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش تعداد قطب ها در شبکه، هزینه عملیاتی کل، کاهش می یابد که این کاهش پس از شبکه ۶ قطبی، سرعت کمتری دارد.

همچنین نتایج بیانگر آن است که با افزایش فاصله بین مبدأ و مقصد، احتمال توقف در فرودگاه قطب افزایش می یابد؛ به گونه ای که برای پروازهای بیش از ۱/۵ ساعت در شبکه های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ قطبی همگی مسافران برای رسیدن از مبدأ به مقصد در یک قطب توقف دارند.

شبکه ۴ قطبی به خاطر اتلاف کمتر وقت مسافران نسبت به شبکه های دیگر و با توجه به هزینه ثابت انتخاب یک فرودگاه به عنوان قطب، شبکه بهینه انتخاب شد. قطب های شبکه ۴ قطبی عبارتند از: تهران، شیراز، کرمان و اصفهان. نتایج نشان می دهد تنها عامل تقاضا، بر انتخاب قطب مؤثر نیست؛ بدین معنی که هر فرودگاهی که بیشترین تقاضا را دارد لزوماً به عنوان قطب انتخاب نخواهد شد و یکی از عوامل مؤثر بر انتخاب قطب، موقعیت جغرافیایی آن است. بدین ترتیب شبکه قطب و اقمار می تواند افزایش بازدهی را برای برخی از فرودگاه های با تقاضای کمتر همراه داشته باشد. برای مثال نتایج نشان داد که در شبکه ۴ قطبی، تعداد مسافرانی که از فرودگاه های کرمان و اصفهان به عنوان قطب استفاده می کنند، بیش از تعداد مسافرانی است که به مقصد این فرودگاه پرواز دارند.

همچنین تحلیل نتایج این شبکه نشان می دهد با توجه به تقاضای موجود و هزینه عملیاتی انواع هواپیماها، هواپیماهای با ظرفیت بالا (ایرباس ۳۰۰) و هواپیماهای با ظرفیت پایین (فوکر ۵۰) تعداد پرواز بیشتری را در این شبکه انجام خواهند داد؛ بنابراین با استفاده از این مدل، شرکت های هواپیمایی می توانند با توجه به الگوی تقاضایشان، ترکیب ناوگان مورد نیاز خود را پیش بینی کنند. مدل ارائه شده، طوری طراحی شده است که قابلیت انعطاف برای توسعه به شرایط مختلف را داشته باشد و قابلیت گسترش و بسط مدل در حالت های دو قطبی و فرضیات جدید نیز وجود دارد.

۶- مراجع

- [1] Gang Yu, Jian Yang, (1998), "Optimization Application in the Airline Industry", Handbook of Combinatorial Optimization, Kluwer Academic Publishers.
- [2] Marianov V., Serra D., (2003), "Location Models for Airline Hubs Behaving as M/D/C queues ", Computers & Operation Research 30 983-1003.
- [3] Adler B., Berechman J., (2001), "Evaluating Optimal Multi-hub Networks in a Deregulated Aviation Market with an Application to Western Europe", Transportation Research Part A 35 373-390.
- [4] O'Kelly M., Miller H., (1994), "The Hub Network Design problem: A Review and Synthesis ", Journal of Transport Geography 2(1) 31-40.
- [5] Sasaki M., Suzuki A., Drezner Z., (1999), "On the Selection of Hub Airports for an Airline Hub-and-Spoke System ", Computers & Operation Research 26 1411-1422.

[۶] سازمان هواپیمایی کشوری، "سالنامه آماری سازمان هواپیمایی کشوری"، ۱۳۸۴.

[۷] قربانی، م، "مدل تقاضای سفر هوایی بین شهری ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ۱۳۷۸

به طور کلی نتایج ارائه شده نشان می دهند که با این مدل، نتایج عددی حاصل، با فرضیات منطقی ارائه شده، هم خوانی داشته و می توان با توجه به داده های ورودی، از نتایج استفاده کرد. همچنین استفاده از این مدل می تواند در موارد زیر به شرکت های هواپیمایی کمک کند:

۱- طراحی شبکه پروازی؛

۲- انتخاب فرودگاه های قطب (پایه) در صورت اقتصادی بودن استفاده از شبکه قطب و اقمار؛

۳- برنامه ریزی برای خرید و سفارش ناوگان مورد نیاز و

۴- تعیین مسیرهای پروازی بهینه برای پاسخگویی بیشینه به تقاضا و افزایش سود.

An Optimum Model for Hub-and-Spoke Network Based on the Current Demand (Case Study: Iran Airport Network)

M. Zabihi Tari¹, M. Saffarzadeh^{2*}, M. Sharifi Yazdi³, A. Abdi⁴

1- Ph.D Candidate, Faculty of Civil & Environmental Eng. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Civil & Environmental Eng. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Ph.D Student, Faculty of Civil & Environmental Eng. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Eng. Azad University, Research Branch, Tehran, Iran

Saffar_m@modares.ac.ir

Abstract:

Air transportation has an important position among the other modes of transportation due to its significant impact in the economy and welfare of a society. Within the several components of air transportation market, flight network plays a fundamental role and considerably affects the airlines revenue. Improvement of the network system requires an accurate plan and programming. Hub-and-spokes are of further interest; as such networks reduce the operational costs, create proper ground for flight network development and extension, and help in competition. However, several models have been introduced for hub-and-spokes design purposes based on the diversity of the effective factors, decision-making variables and different forms of the network.

Generally speaking, hub-and-spokes are categorized into two principal sectors: single allocation and dual or multiple allocations. Within a single allocation, traffic is accumulated in a single hub and then distributed to the destinations, while within a dual-allocation network, the gathered traffic at the first hub is again distributed to another hub before directing it to the final destination. This research presents a linear model for hub-and-spokes evaluation and planning, determining optimum flight routes and fleet assignment. The model considers both direct flights and hub connections, and outputs an optimum network based on the mixture of these two options. Sets of airport connections are so designed to well cover all the necessary inter-airport trips. This particular is done by utilizing hub-and-spoke system as the airport networks. To fulfill the requirements of the study location (Iran), in this paper, single allocation was selected to develop the models, meaning that just one hub has been considered in the modeling process. Inter-airport demands of the passengers were inputted in the network and the model works only for passenger transportation. The objective was to design the hubs so as to obtain an optimum network. In other words, the model is to suggest the best option with which the demand is handled cost-effectively. Trips are planned to be either direct or meeting a one-hub maximum. As the model is to minimize the cost, such variables as demand for variety of routes and type and quantity of the available aircrafts were included. The model was developed in two stages to ease the process. The first stage dealt with the target function and the fleet was assigned to the

outputs of the stage one. Iran's internal flight network was chosen as the case of study to develop the model based on the country's geographical situation and available data. 59 airports were chosen as the total set of airports and trip origins. The number of hub candidates and destination airports were eight including Isfahan, Ahwaz, Bandar Abbas, Tabriz, Tehran, Shiraz, Kerman and Mashhad airports. Based on the availability, the data of five types of aircrafts were used in the model development. Lingo Version 8 has run the model using branch-and-bound method to obtain accurate and reliable outputs. Up to eight hub networks were considered by the model and the model confirmed that with increase in the number of hubs, operational cost decreased. However, cost reduction had lower rate for the systems with six hubs and over. The results also suggested that the probability of stop in a hub rises for longer trips. Flights longer than 1.5 hours had to stop at one hub in three-, four-, five-, six- and eight-hub networks.

Four-hub network was found to be the optimum one due to having the shortest stop slot where fixed cost has been allocated for selecting an airport as the hub. The hubs of the optimum four-hub network are Tehran, Shiraz, Kerman and Isfahan airports. The results showed that demand is not the only effective factor in the selection of the hub; it means that another key factor, geographical positions, has effect and the airport with higher demand is not necessarily selected as the hub. Therefore, hub-and-spokes can enhance the efficiency of the airports with lower demands. As an example out of the results, passengers intended to use Isfahan and Kerman airport as their hubs in a four-hub network were more than the ones targeting Isfahan and Kerman airports as destinations. Analysis of the four-hub network cleared that, according to the current demand and operational costs of different aircrafts, large planes (e.g. Airbus 300) and small planes (e.g. Foker 50) will perform more flights in comparison with other types. Using the model developed in this research, airlines will be able to forecast and plan their required fleet combination based on the demands.

Keywords: Hub and Spoke, Air transportation, Airport, Optimization